

Präklinische Analyse: keramische Zahnkronen unterschiedlicher Yttriumstabilisierung im Hoop-Strength-Test

Towards preclinical analysis: dental ceramics with different yttrium-stabilization in hoop-strength-testing

Johannes Mayer^{1,*}, Ulrich Lohbauer², Renan Belli², Sandro Wartzack¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Department Maschinenbau, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Martensstraße 9, 91058 Erlangen, Germany

² Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Zahnklinik 1 – Zahnerhaltung und Parodontologie, Forschungslabor für dentale Biomaterialien, Glückstraße 11, 91054 Erlangen

* Korrespondierender Autor:

Johannes Mayer
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk
Martensstraße 9
91058 Erlangen
☎ +49 9131/ 85 23 216
✉ mayer@mfk.fau.de

Abstract

Fracture of dental crowns is a common clinical failure scenario. The fractures are often caused by cracks in the crown margin. Scientists from dental and design technology have therefore developed a simplified sphero-cylindrical model to evaluate the stress in the crown margin. Using this model, four modern oxide ceramics are investigated both experimentally and by finite element simulation. The results correspond to the expected strength values quantitatively and qualitatively. In addition to material comparison, the validity of the simplified sphero-cylindrical crown model is supported. In the future, the model will be used for further, pre-clinical evaluation and optimization of restoration design.

Keywords

Pre-clinical relevance, multilayer zirconia, crown margin design, finite element method

1. Motivation: Finite-Elemente-Simulation von Zahnkronen

Aus konstruktionswissenschaftlicher Sicht handelt es sich bei Zahnrestorationen um sehr spezialisierte Konstruktionen: sie durchlaufen patientenindividuelle Fertigungsschritte, müssen hohe, geometrische Genauigkeitsanforderungen erfüllen und nicht zuletzt hohe Beanspruchung aushalten. Die medizinische und werkstoffliche Forschung bewegt sich stets am Rand der spezifischen Machbarkeitsgrenze. Dennoch sind gebrochene Zahnkronen immer noch ein häufiges klinisches Fehlerbild [1]. Frakturen gehen häufig auf Risse am Kronenrand zurück [2, 3].

In der technischen Produktentwicklung haben sich Simulationsmethoden etabliert, um vor der Anwendung und noch vor der aufwändigen Bauteilprüfung die Strukturmechanik auszuwerten. Daher haben Wissenschaftler aus Zahn- und Konstruktionstechnik ein sphäro-zylindrisches Ersatzmodell entwickelt, um die Beanspruchungssituation im Kronenrand experimentell und numerisch abzubilden [4]. Mit diesem systematischen Ansatz gelingt eine Abstraktion der Kronenrandgestalt unter okklusall-zentrischer Belastung auf ein formalisiertes und parametrisiertes Ersatzmodell [4]. Konsequenterweiterung, liegt in einer Simulationsunterstützung wie dieser das Potential, Zahnrestorationen schon in der Entstehungsphase durch erweiterte Kenntnisse des Strukturverhaltens zu optimieren und dadurch Brüchen und Schäden beim Patienten zuvorzukommen. Das ist angesichts des Gestaltungsprozesses bei den aktuell relevanten Werkstoffen umso dringender geboten. Denn im Gegensatz zu Metallen, sollte bei Keramiken die maßgebliche Formgebung bereits vor einer finalen Wärmebehandlung und vor der Ausbildung der endgültigen Werkstoffeigenschaften erfolgen. Spanende Hartbearbeitung ist zu vermeiden [5]. In der Ausrichtung auf das langfristige Ziel der simulationsgestützten, präklinischen Analyse von Zahnrestorationen greift diese Publikation den Finite-Elemente-basierten Hoop-Strength-Test auf. Damit werten wir keramische Restaurationsmaterialien mit Hinblick auf randinduziertes Kronenversagen aus [4].

2. Auf dem Weg zur präklinischen Analyse

Auf dem Weg zur präklinischen Analyse ist neben den Aspekten in konstruktionswissenschaftlicher sowie zahnmedizinischer Hinsicht vor allem auch der Bereich der Materialforschung ein wesentlicher Faktor. Im Bestreben, den optimalen Werkstoff für das Anspruchsprofil zu finden, wurden bereits vielfältige, werkstoffklassenübergreifende Materialien verwendet. Aktuell sind Zirkonoxide ein Werkstoff der Wahl für viele Restaurationssituationen, unter anderem für monolithische Einzelzahnkronen. Diese Keramiken erreichen sehr hohe theoretische Festigkeiten (~ 1000 MPa), sind von Haus aus hart, biokompatibel, und durch ein natürliches Erscheinungsbild ästhetisch ansprechend. Desweiteren zeichnen sie sich durch eine charakteristische Fähigkeit zur Zähigkeitssteigerung gegenüber anderen Keramiken aus. Allerdings sind Keramiken generell spröde Materialien. Die Materialforschung unternimmt deshalb große Anstrengungen, um die Versagenswahrscheinlichkeit der Dentalkeramiken zu minimieren [6]. Festigkeit und Weibullmodul sollen für Restaurationsmaterial möglichst hoch sein. Durch oxidische Zulegierung wird u.a. auf Festigkeits- und Zähigkeitssteigerungen abgezielt. In diesem Paper untersuchen wir vier verschiedene, kommerziell erhältliche Zirkonoxidkeramiken. Das sind CEREC MTL Zirconia (DentsplySirona, 3/4 Y-PSZ, MTL), Katana Zirconia One (Kuraray, 5Y-PSZ, KAT), e.max ZirCAD MT Multi (Ivoclar, 4Y-PSZ, ZMT) und e.max ZirCAD Prime (Ivoclar, 3Y-PSZ, ZPR).

3. Zirkonoxid

Obwohl sie meist alle gleich als Zirkonoxid bezeichnet werden, handelt es sich bei den entsprechenden Dentalkeramiken um synthetische Rohstoffe auf Zirkonoxidbasis. Für einen detaillierten Einblick in die Rohstoffaufbereitung von Zirkonsand zu Nanopartikelpulver wird auf einschlägige Literatur verwiesen [7]. Der Prozess enthält chemische, wie auch mechanische Einflüsse, wie etwa Zugabe von Sinteradditiven, Sprühtrocknung und nicht zuletzt die Verdichtung und Teilsinterung zu Grünkomponenten. Von dieser Behandlung ist eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften zu erwarten, sodass je nach Erzeugungsstrategie resultierende Materialien mit unterschiedlich ausgebildeten Eigenschaften zu erwarten sind [7].

Reines Zirkonoxid (ZrO_2) allein wäre nicht in unbeschädigte Kronenform bei Raumtemperatur zu bringen [7]. Das liegt daran, dass die werkstoffliche Gitterstruktur in Abhängigkeit der Temperatur deutlichen Änderungen unterliegt. Die wichtigste Änderung erfolgt bei etwa 1170°C , wenn die tetragonale Phase zur monoklinen Phase wechselt und sich damit verbunden auch das Volumen ändert. Das geschieht bei Abkühlung, wie auch beim Aufheizen. Die unterhalb von 1170°C vorliegende, monokline Phase weist ein 3-4% größeres Volumen als die tetragonale Phase auf. Ohne Weiteres würde der Werkstoff bei Temperaturänderung in diesem kritischen Bereich riss- und bruchinitiierenden Spannungen ausgesetzt. Monoklines Zirkonoxid hat weniger herausragende mechanische Eigenschaften als tetragonales oder kubisches Zirkonoxid.

Um die tetragonale Phase auch bei Raumtemperatur zu erhalten, wird der Werkstoff gezielt mit anderen Metalloxiden versetzt. Meist wird Yttriumoxid in verschiedenen Anteilen zugemischt. Unter Angabe des Molanteils bezeichnet man die Resultate als Yttrium-stabilisiertes, tetragonales und polykristallines Zirkonoxid (bspw. 3Y-TZP) oder teilstabilisiertes Zirkonoxid (bspw. 3Y-PSZ; partially stabilized zirconia). Eine Besonderheit ist die lokale, martensitische Umwandlung zur monoklinen Phase bei Rissfortschritt. Das geschieht auch bei Raumtemperatur. Wegen der Volumenzunahme entsteht eine Tendenz, der Rissausbreitung durch Druckspannung entgegenzuwirken und damit in gewissem Rahmen die Zähigkeit zu steigern. Dieser Effekt nimmt mit steigendem Yttriumanteil ab. Die Zugabe von Yttriumoxid bewegt sich üblicherweise im Bereich von 3 bis 8 mol-%. Abhängig davon, ist neben der Auswirkung auf die Zähigkeit auch eine Änderung in den mechanischen und ästhetischen Eigenschaften festzustellen. 3Y-PSZ hat eine qualitativ höhere Festigkeit und Zähigkeit als etwa 5Y-PSZ. Gleichzeitig hat es eine geringere Transluzenz. Die Auswahl eines speziellen Zirkonoxids zur Restauration ist je nach schwerpunktsetzenden Kriterien entsprechend kompromissbehaftet [8]. Inzisal werden transluzentere, marginal festere Keramiken gewählt, was beim Mehrschichtaufbau in einem einzelnen Werkstoff umsetzbar ist. Die vier Materialien MTL, KAT, ZMT und ZPR sind mehrschichtig. Sie weisen unterschiedliche Farbgradienten (KAT, MTL, ZMT, ZPR), sowie zusätzlich unterschiedliche Festigkeiten auf (MTL, ZMT, ZPR). Die unterschiedliche Yttriumstabilisierung ist zu beachten, siehe. Tab. 1.

Tabelle 1: Dentalkeramiken (Zirkonoxid) mit Yttriumanteil und Biegefestigkeit nach Herstellerangaben.

Material	Yttriumanteil (Mol%)	Herstellerangabe (Biegefestigkeit)
Katana Zirconia One (KAT)	5Y-PSZ	933 MPa [9]
e.maxZirCAD MT Multi (ZMT)	4/5Y-PSZ	850 MPa [10]
Cerec MTL Zirconia (MTL)	3/4Y-PSZ	850 MPa [11]
e.maxZirCAD Prime (ZPR)	3/4/5Y-PSZ	1200 MPa [12]

4. Vorgehen zur Analyse keramischer Kronenmodelle im Hoop-Strength-Test

4.1. Überblick

Wir nutzen das Halbkugelschalenersatzmodell zum Vergleich der verschiedenen, oxidkeramischen Restaurationsmaterialien [4]. Dazu wurden Bruchexperimente mit einem Stempel-Druck-Versuch unternommen, sowie numerische Analysen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ausgewertet. Von den gemessenen, charakteristischen Bruchkräften schließen wir per Finite-Elemente-Simulation auf den Spannungszustand im Kronenrandbereich bei Umfangsspannung. Schließlich wird die Bruchkraft nach Weibull (F_0) und der Weibullmodul (m) ermittelt.

4.2. Modellierung

Zunächst wurden Kronenmodelle im CAD-System erzeugt. Die realistische Kronengeometrie wird im Modell durch einen idealisierten Dom repräsentiert (vgl. Bild 1). Indem die Symmetrie genutzt wird, kann für die FE-Analyse die Modellierung auf einen Viertelbereich eingeschränkt werden. Bild 1 zeigt die 3D-Modelle der Dome mit Innenradius von 5,07 mm und Außenradius von 5,72 mm, sodass eine Wandstärke von 0,65 mm resultiert. Weiterhin sind idealisierte Stempel und Matrize des Bruchversuchs abgebildet. Der zylindrische Abschnitt des sphäro-zylindrischen Doms hat eine Länge von 2 mm außen und geht auf der Innenseite tangential in einen Radius von 0,5 mm über. Daneben ist eine Aufnahme des realen Versuchs abgebildet (Bild 1).



Bild 1: Modellierte Ersatzgeometrie (links) für eine Zahnkrone (Mitte) und Stempel-Druck-Versuch (rechts).

4.3. FE-Simulation

Bei den Keramiken als spröden Werkstoffen findet kein nennenswertes plastisches Fließen statt. Stattdessen tritt bei Überschreiten des Festigkeitsgrenzwerts Sprödbbruch ein. Exemplarisch ist in Bild 2 die sehr geringe, simulierte Verschiebung von maximal 40 nm bei Bruchsituation dargestellt. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse wurden an der Hauptspannungshypothese ausgewertet, derzufolge die betragsmäßig maximale Hauptspannung maßgeblich für den Bruch ist. In den vorliegenden Fällen ist das auf die Zugspannung zu beziehen. Als simulierte Kraft kam die gemessene Bruchkraft aus Stempel-Druck-Versuchen zum Einsatz.

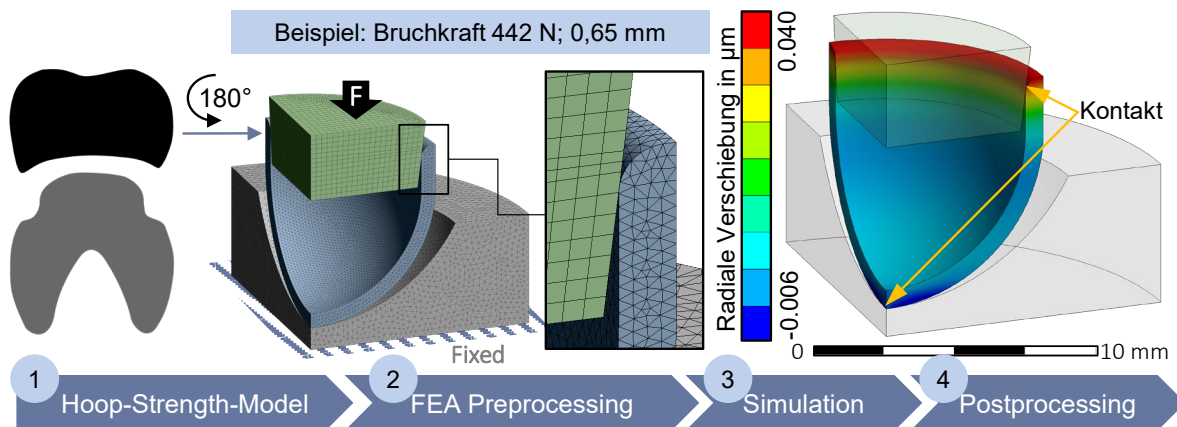


Bild 2: Finite-Elemente-Simulation mit dem dargestellten Ergebnis der radialen Verschiebung.

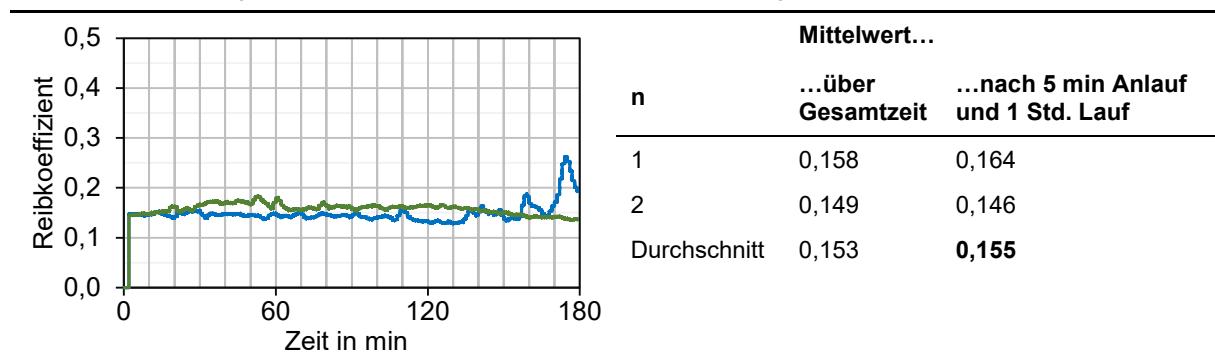
4.4. Bruchexperimente

Die Herstellung der Grünlinge erfolgte gemäß CAD-CAM-Prozess mit maschinelltem Fräsen (PrimeMill, DentsplySirona) und Sinterung (CS6 Programat, Ivoclar). Vor Probenkörperfertigung wurden produktspezifisch 20 vol% Sinterzuschlag berücksichtigt. Die fertiggesinterten Prüfkörper wurden zwischen einer Auflage und einem um 7 Grad konifizierten, gehärteten Stahlstempel gebrochen (Bild 1). Die Kontaktstelle war mit Silikonöl geschmiert. Die Bruchkräfte wurden aufgezeichnet. Dieser Test wurde für die vier Testmaterialien durchgeführt (Stichprobenzahl je $n=30$).

4.5. Reibzahlermittlung: Stift-Scheibe-Versuche

Sowohl zwischen Dom und Stempel, als auch zwischen Dom und Matrize liegt ein Kontakt vor. In der FE-Analyse wurde dafür je ein reibungsbehafteter Kontakt eingestellt. Die Reibzahl wurde zuvor eigens im Stift-Scheibe-Versuch ermittelt. Dazu wurden Stifte aus Zirkonoxid (e.max ZirCAD MT Multi) nach CAD-CAM-Vorgehen (vgl. Kap. 4.4) gefertigt. Das Gegenstück war jeweils eine gehärtete und polierte Stahlscheibe (100Cr6, 60 HRC). Als Zwischenmedium beim Stift-Scheibe-Versuch kam Silikonöl aus dem gleichen Gebinde wie bei den Bruchversuchen zum Einsatz. Die Schmiermenge betrug 5 μl und die über die Versuchsdauer konstante Normalkraft 10 N.

Tabelle 2: Auswertung der Stift-Scheibe-Versuche zur Reibzahlermittlung



6. Ergebnisse des sphäro-zylindrischen Ersatzmodells in Bezug zur Umfangsspannung (Hoop-Strength)

Die Reibzahl wurde als Wert von 0,155 ermittelt. Über die Laufzeit von je drei Stunden bei ähnlich klimatisierten Bedingungen (21,1°C, relative Luftfeuchte 52,6% bzw. 22,7°C & 47,7%) zeigten sich nach kurzer Einlaufphase Reibwerte von etwa 0,164 und 0,146. Damit Probenverschleißeffekte nicht überproportional einfließen, konzentriert sich die Auswertung auf den Bereich nach fünfminütigem Einlaufen und einstündigem Lauf.

Als weitere Materialkonstanten wurden in der Finiten-Elemente-Simulation ein E-Modul von 216 GPa für die Keramiken und Poissonzahl von 0,314 genutzt [13]. Die Bruchkräfte und maximal auftretenden Spannungen fallen für die vier Materialien entsprechend Bild 3 aus.

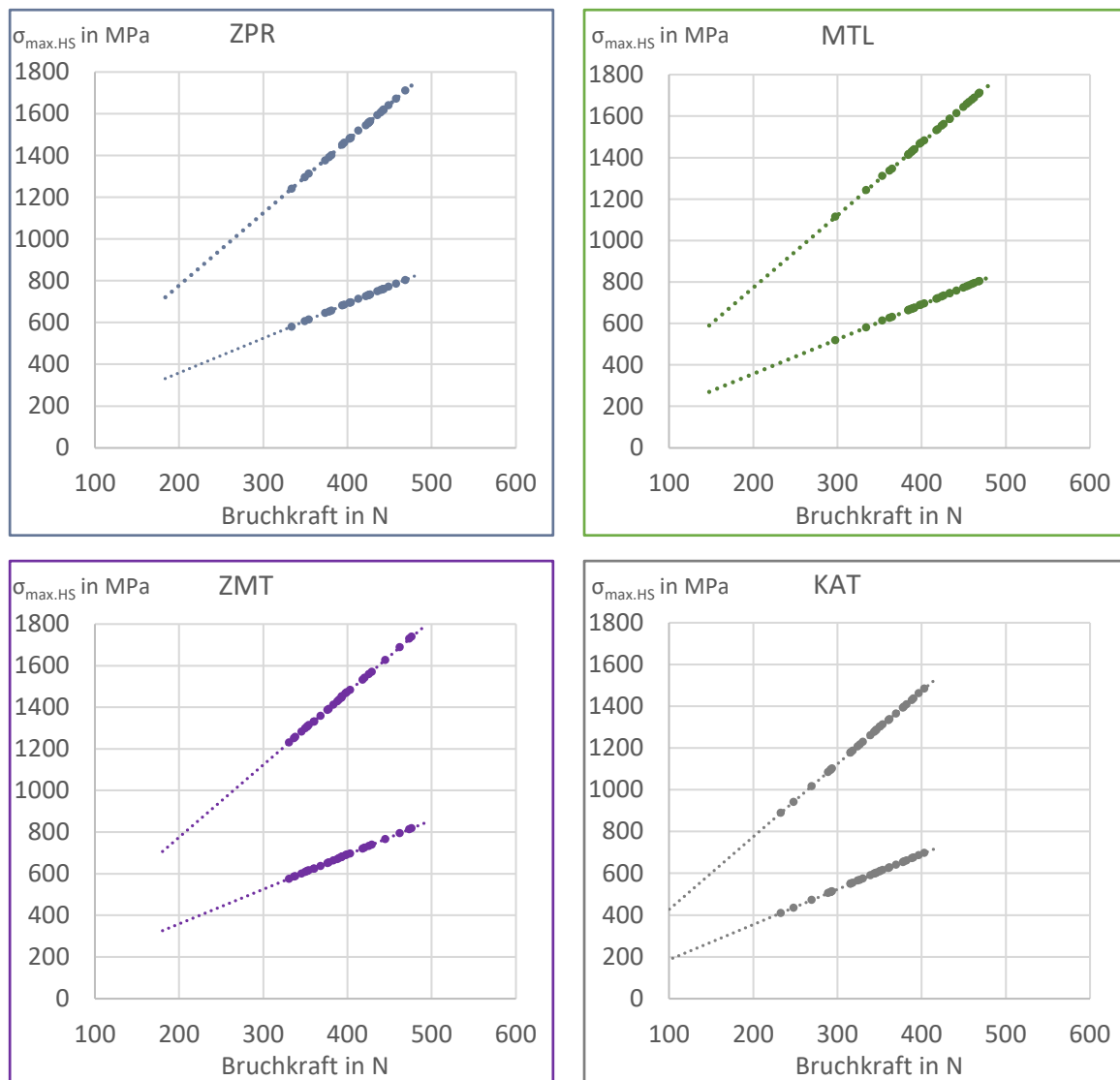


Bild 3: Ergebnisse aus experimentellen und numerischen Versuchen: simulierte Spannungen & Bruchkräfte.

In Bild 3 sind die maximal auftretenden Hauptspannungen bei Versagen für die zwei Randbereiche der Innen- und Außenkontur dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Spannungen innen stets höher als außen sind, wie es gemäß der Umfangsspannungsverteilung im Modell des druckbeaufschlagten Kessels zu erwarten ist. Die Spannungswerte sowohl innen, als auch außen, steigen linear, wobei die absolute Differenz zwischen maximaler Hauptspannung an der Innenkontur und maximaler Hauptspannung an der Außenkontur bei steigender Belastung zunimmt. Allerdings bleibt die relative Differenz gleich. Bei der hier vorliegenden

Versuchsanordnung ist das Verhältnis ($\sigma_{\text{außen}}/\sigma_{\text{innen}}$) etwa konstant bei 0,5. Die Gründe für die divergierenden Absolutwerte, aber konstante Relation, sind, dass die Umfangsspannung zwar linear zur Bruchkraft skaliert, jedoch im lokalen Bezug nach Lamé einzig von den geometrischen Verhältnissen abhängt [14]. So kann aus der Umfangsspannung eines dickwandigen Zylinders $\sigma_t(r)$ das Verhältnis von Umfangsspannung am Innenradius r_i zum Außenradius r_a hergeleitet werden. Weil sich der Druck p kürzt, ist das Verhältnis gleichbleibend, wenn keine Geometrieänderung vorgenommen wird.

$$\sigma_t(r) = \frac{pr_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_a^2}{r^2}\right)$$

$$\frac{\sigma_{t,\text{innen}}}{\sigma_{t,\text{außen}}} = \frac{\sigma_t(r_i)}{\sigma_t(r_a)} = \frac{2r_i^2}{r_i^2 + r_a^2}$$

In den hier ausgewerteten Fällen bleibt die Geometrie unverändert, wodurch folglich auch die relative Differenz in den Hauptspannungswerten unverändert bleibt.

Die Resultate fallen im Quervergleich qualitativ so aus, wie es der Yttriumanteil vermuten lässt (höhere Festigkeit bei 3Y-PSZ ggü. 5Y-PSZ). In der Zusammenfassung gibt Tab. 3 charakteristische Werte an, wobei jeweils der im Randbereich vorherrschende Yttriumanteil aufgeführt ist.

Tabelle 3: Bruchkräfte (F_0), Weibullmoduli (m) und maximale Hauptspannungen an Innen (σ_{innen})- und Außenkontur ($\sigma_{\text{außen}}$), mit jeweils 90% Konfidenzintervallen.

Material	Yttriumanteil (Mol%)	Bruchkraft F^0 Weibullmodul m (90% Ci)	σ_{innen} m (90% Ci)	$\sigma_{\text{außen}}$ m (90% Ci)
KAT	5Y-PSZ	354,6 N, (342,9 - 366,7 N)	1313 MPa	615 MPa
		9,8 (7,4 - 11,9)	10,5 (7,9 - 12,8)	10,2 (7,7 - 12,4)
ZMT	4Y-PSZ	408,4 N, (394,4 - 423,2 N)	1500 MPa	704 MPa
		9,7 (7,2 - 11,9)	10,3 (7,8 - 12,6)	10,2 (7,7 - 12,5)
MTL	3/4Y-PSZ	425,8 N, (414,0 - 438,0 N)	1561 MPa	733 MPa
		11,9 (8,9 - 14,5)	12,5 (9,4 - 15,2)	12,3 (9,3 - 15,1)
ZPR	3Y-PSZ	426,5 N, (415,8 - 437,5 N)	1563 MPa	734 MPa
		14,7 (10,7 - 18,3)	15,5 (11,2 - 19,3)	15,3 (11,1 - 19,0)

7. Diskussion des sphäro-zylindrischen Ersatzmodells in dieser Auswertung

Aus den Spannungswerten schließen wir per Hauptspannungshypothese direkt auf die qualitative Festigkeit der Keramiken. Einige Modellannahmen und dementsprechend Vereinfachungen sind enthalten. So sind alle vier Materialien mit identischem E-Modul, Poissonzahl und Reibkoeffizienten in der FE-Simulation modelliert, wo theoretisch auch geringfügige Unterschiede möglich sind. Die Ähnlichkeit im Vergleich ist an anderer Stelle wiederum sehr vorteilhaft: die identischen Versuchsbedingungen und nicht zuletzt die Tatsache, dass die experimentellen Versuche und numerischen Simulationen die identische Domgeometrie nutzen, stärken die Aussagekraft. Statt an standardisierten Prüfkörpern wie beispielsweise Zugstäben bzw. Biegeproben, wird die qualitative Aussage hier an dem praxisnäheren Dommodell gezogen. Während diese sphäro-zylindrische Geometrie generell eine deutliche Vereinfachung der Realität darstellt, bietet sie jedoch gerade an der kritischen Stelle des Kronenrands eine geschickte Abstraktion zur geometrieabhängigen Abbildung der Umfangsspannung. Über die konisch induzierte Kraffteinleitung am Kronenrand (Hoop-Spannung) wird eine Fraktur genau an dieser, klinisch relevanten Stelle induziert. Die bruchauslösende Stelle am Kronenrand wird in fraktografischer Analyse verifiziert. Damit werden für die getesteten Materialien charakteristische Festigkeitswerte ermittelt, die im

Einklang mit den bisherigen Erkenntnissen zur Yttriumstabilisierung stehen. In gegenseitiger Übereinstimmung zwischen Literatur und diesen Ergebnissen korreliert der Yttriumgehalt im Rahmen der hier betrachteten Grenzen mit der Festigkeit.

Durch die experimentell ermittelten Ergebnisse wird der Realitätsbezug der Hoop-Stress-Simulation hergestellt. Die Simulationsergebnisse stimmen mit der Theorie zum Kesselinnendruck qualitativ überein. Die Simulation liefert plausible Ergebnisse und kann für die Evaluation von Kronenrandformen herangezogen werden. Sie kann weiterhin für Designentscheidungen zu Kronenrandformen genutzt werden und ist in diesem Teilbereich im Restaurationsprozess eine nützliche Methode der Simulationsunterstützung. Während die Geometrie hier unverändert bleibt, sind zukünftige Auswertungen noch praxisnäherer Kronenrandpräparation mit relevanter, geometrischer Modellanpassung absehbar.

8. Ausblick

Eingangs wurde die Perspektive eröffnet, den Prozess rund um die Zahnrestauration mit Simulationsmethoden zu verbessern. Diese Veröffentlichung ist ein Zwischenschritt für das langfristige Vorhaben, die Schadensquote weiter zu reduzieren. Über das sphäro-zylindrische Dommodell für monolithische Kronen hinaus ist die Konzeption einer prinzipiell ähnlichen Strategie für Brücken und Implantate denkbar. Statt mit wenigen, generalisierten Werkstoffkennwerten arbeiten zu müssen, profitiert die Praxis auf diese Weise in mehreren Restaurationsszenarien durch individuell spezialisierte Simulationen zur Designoptimierung. Die simulationsgestützte Rückmeldung soll dabei in Echtzeit erfolgen. Dann steht die Information über die Überlebensrate von Kronen, Brücken und Implantaten Zahntechnikern und –ärzten vorab zur Verfügung, während sich eine Beurteilung bisher mitunter erst nach Jahren des Einsatzes eines Werkstoffs in klinischen Ausfällen manifestiert. Weitere Zwischenschritte auf dem Weg zu diesem Ziel sind die Verknüpfung mit einem realistischen Belastungskollektiv, die Erweiterung der Simulationen für andere Restaurationsfälle und die Verknüpfung mit einer prognostizierten Ausfallwahrscheinlichkeit über die Lebensdauer.

Danksagung

Die Autoren danken Dipl.-Ing. Ute Wolf für die Unterstützung bei der Durchführung der Stift-Scheibe-Tribometerversuche.

Unser Dank geht auch an den Dentalhersteller Ivoclar (Schaan, Liechtenstein) für die Unterstützung mit den Versuchsmaterialien.

Literaturverzeichnis

- [1] Belli, Renan; et al.: Fracture Rates and Lifetime Estimations of CAD/CAM All-ceramic Restorations. In: Journal of Dental Research Vol. 95 (2016), Nr. 1, S. 67-73 2016. DOI: 10.1177/0022034515608187.
- [2] Oilo, Marit; Gjerdet, Nils Roar: Fractographic analyses of all-ceramic crowns: A study of 27 clinically fractured crowns. In: Dental Materials, Vol. 29 (2013), Nr. 6, S. 78-84. DOI: 10.1016/j.dental.2013.03.018.
- [3] Oilo, Marit; Quinn, George D.: Fracture origins in twenty-two dental alumina crowns. In: Journal of the mechanical behavior of biomedical materials Vol. 53 (2016), Nr. 1, S. 93-103. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2015.08.006.
- [4] Belli, Renan; et al.: Development of a hoop-strength test for model sphero-cylindrical dental ceramic crowns: FEA and fractography. In: Journal of the European Ceramic Society Vol. 40 (2020), Nr. 14, DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.064.
- [5] Lohbauer, Ulrich; N. Ilie und M. Rosentritt: Keramische Frakturen – Erfahrungen aus der Klinik. Ursachen und Strategien zur Vermeidung von Keramikfrakturen. In: Das Deutsche Zahnärzteblatt Vol. 125 (2016), Nr. 7+8, S. 320-326.

-
- [6] Soares, Pablo Machado; et al.: Load-bearing capacity under fatigue and FEA analysis of simplified ceramic restorations supported by Peek or zirconia polycrystals as foundation substrate for implant purposes. In: Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials Vol. 123 (2021), Nr. 1. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104760.
- [7] Lohbauer, Ulrich; Belli, Renan: Dental Ceramics. Springer, 2022. DOI: 0.1007/978-3-030-94687-6.
- [8] Zhang, Fei; et al.: Trade-off between fracture resistance and translucency of zirconia and lithium-disilicate glass ceramics for monolithic restorations. In: Acta Biomaterialia Vol. 91 (2019), Nr. 1, S. 24-34. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.04.043
- [9] Website, Katanablocks. URL: <https://www.katanablocks.us/katana-zirconia-one/>. Zuletzt abgerufen: 09.07.2025.
- [10] Website, Ivoclar. URL: https://www.ivoclar.com/de_de/products/digital-processes/ips-e.max-zircad. Zuletzt abgerufen: 09.07.2025.
- [11] Website, Dentsplysirona. URL: <https://www.dentsplysirona.com/de-de/entdecken/produktmarken-entdecken/cerec-mtl-zirconia.html>. Zuletzt abgerufen: 09.07.2025
- [12] Website, Ivoclar. URL: https://www.ivoclar.com/de_de/products/digital-processes/ips-e.max-zircad-prime-family. Zuletzt abgerufen: 09.07.2025.
- [13] Belli, Renan; et al.: Relationships between fracture toughness, Y_2O_3 fraction and phases. In: Journal of the European Ceramic Society Vol. 41 (2021), Nr. 15, S. 7771-7782. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.08.003.
- [14] Weber, Michael: Strukturspannungsberechnung bei zylindrischen Behältern mit Aufdachungen unter Innendruck. In: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.): Forschungsbericht 224, 1998.